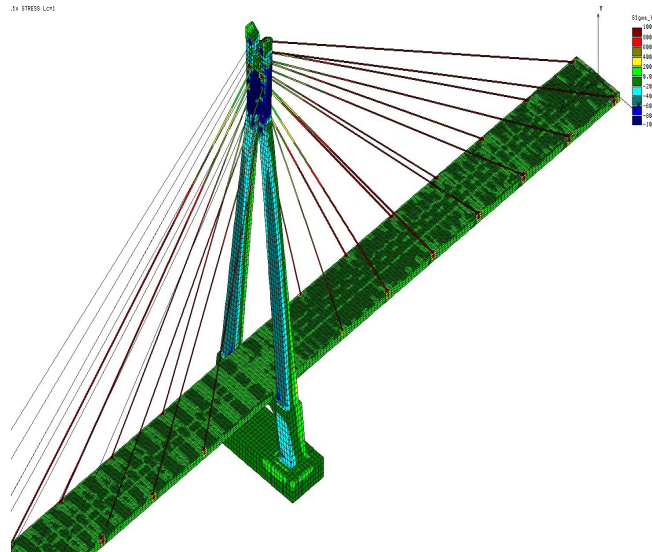


# ПРОЧНОСТНОЙ МОНИТОРИНГ, КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

В силу значительной сложности современных инженерных сооружений, практически невозможно в процессе расчета и проектирования этих сооружений предусмотреть и ввести в расчетную схему все возможные эксплуатационные ситуации, которые к тому же могут меняться в процессе эксплуатации. Кроме того, в процессе эксплуатации весьма сложным и не всегда предсказуемым образом изменяются и характеристики материалов, и параметры внешних воздействий и другие факторы, сопровождающие процесс эксплуатации. В процессе эксплуатации в сооружениях появляются и развиваются дефекты и повреждения различного вида и характера, которые также оказывают весьма неблагоприятное влияние на эксплуатационное состояние сооружения.



Для обеспечения надежного функционирования вновь создаваемых и уже существующих транспортных сооружений требует разработки и применения специальной системы наблюдений за состоянием сооружения, его дефектами, повреждениями, нагрузками, другими внешними воздействиями с тем, чтобы прогнозировать характер и этих изменений и вызываемых ими изменений напряженно-деформированного и поврежденного состояния сооружения с целью своевременного принятия мер по обеспечению безопасной эксплуатации сооружения в изменившихся условиях эксплуатации.

Для выполнения такого вида работ в свое время была предложена **структура прочностного мониторинга сложных инженерных сооружений**, которая была распространена на газопроводные системы, системы хранения нефтепродуктов и другие системы.

Применение современных высокотехнологичных измерительных технологий и современных средств интеллектуальной поддержки принятия решений с использованием современных компьютерных технологий дает возможность решать гораздо более сложные задачи безаварийной эксплуатации сложных строительных и транспортных объектов на уровне **комплексного мониторинга** их полного жизненного цикла.

Осуществление высокотехнологичного **прочностного мониторинга сложных объектов** промышленного, гражданского и транспортного строительства позволит прогнозировать наступление многих неблагоприятных и даже аварийных ситуаций и разрабатывать эффективные меры противодействия или уменьшения последствий неблагоприятных внешних воздействий.

Так как **прочностной мониторинг** всегда должен являться элементом научно-технического сопровождения и эксплуатации инженерных сооружений, то следует отметить следующие направления в развитии технической политики эксплуатации инженерных сооружений:

- экспериментальные методы диагностики сооружений (включая экспресс-методы), базирующиеся на использовании тех или иных физических эффектов и применении современной регистрирующей аппаратуры и персональных ЭВМ:

- расчетно - теоретические методы оценки надежности с определением износа и остаточного ресурса сооружений с учетом дефектов и повреждений, упруго-пластической работы материалов;

- совершенствование и разработка новых эффективных конструктивно - технологических решений для усиления конструкций, включая нормативную базу для эксплуатации и реконструкции, проверка этих решений на реальных сооружениях;

- технология профилактики, ремонта и реконструкции сооружений и, в первую очередь, создание и совершенствование материалов, машин, оборудования и унифицированных конструктивно –технологических решений;

- управление эксплуатацией сооружений, включая автоматизацию оценки состояния, оптимального планирования ремонта, реконструкции, обеспечение безопасности эксплуатации;

- разработка системного (комплексного) подхода к проектированию, строительству сооружений (включая контроль качества строительства, теорию эксплуатации сооружений) с тем, чтобы требования эксплуатации и экологии в оптимальном объеме удовлетворялись еще на стадии вариантных проработок.

# Системы деформационного мониторинга несущих конструкций сооружений

Автодорожный мост «Коммодор Джон Бэрри» (Commodore John Barry Bridge) через р. Делавер возле Филадельфии США.

Русловое пролетное строение моста перекрывает пролеты 250, 500 и 250м (рис.1).

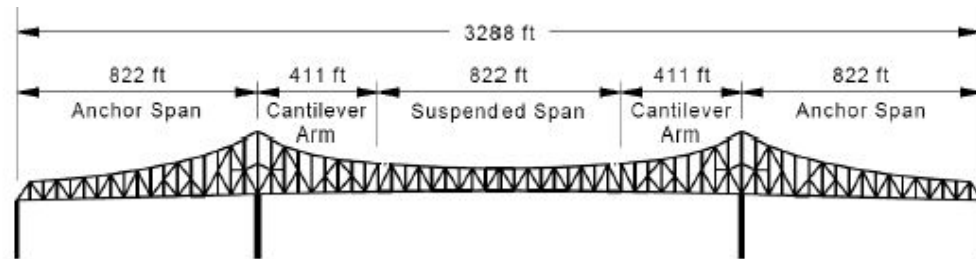


Рис. 1. Схема моста «Коммодор Джон Бэрри»

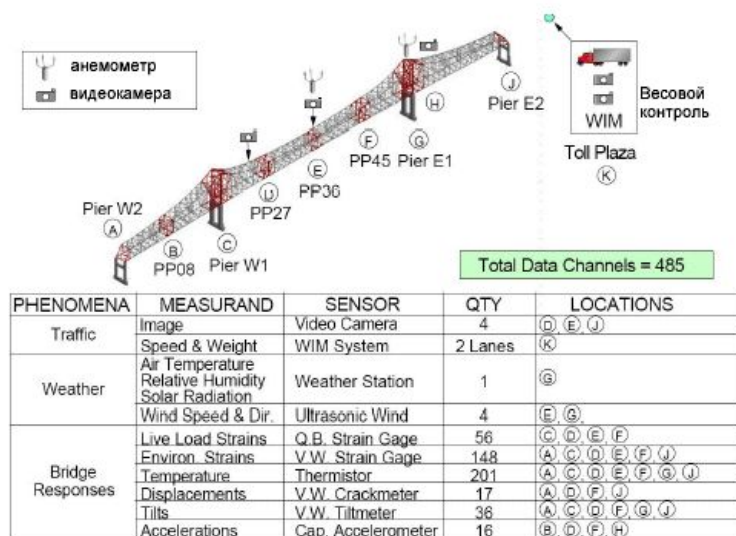


Рис. 2. Схема установки датчиков на мосту «Коммодор Джон Бэрри»

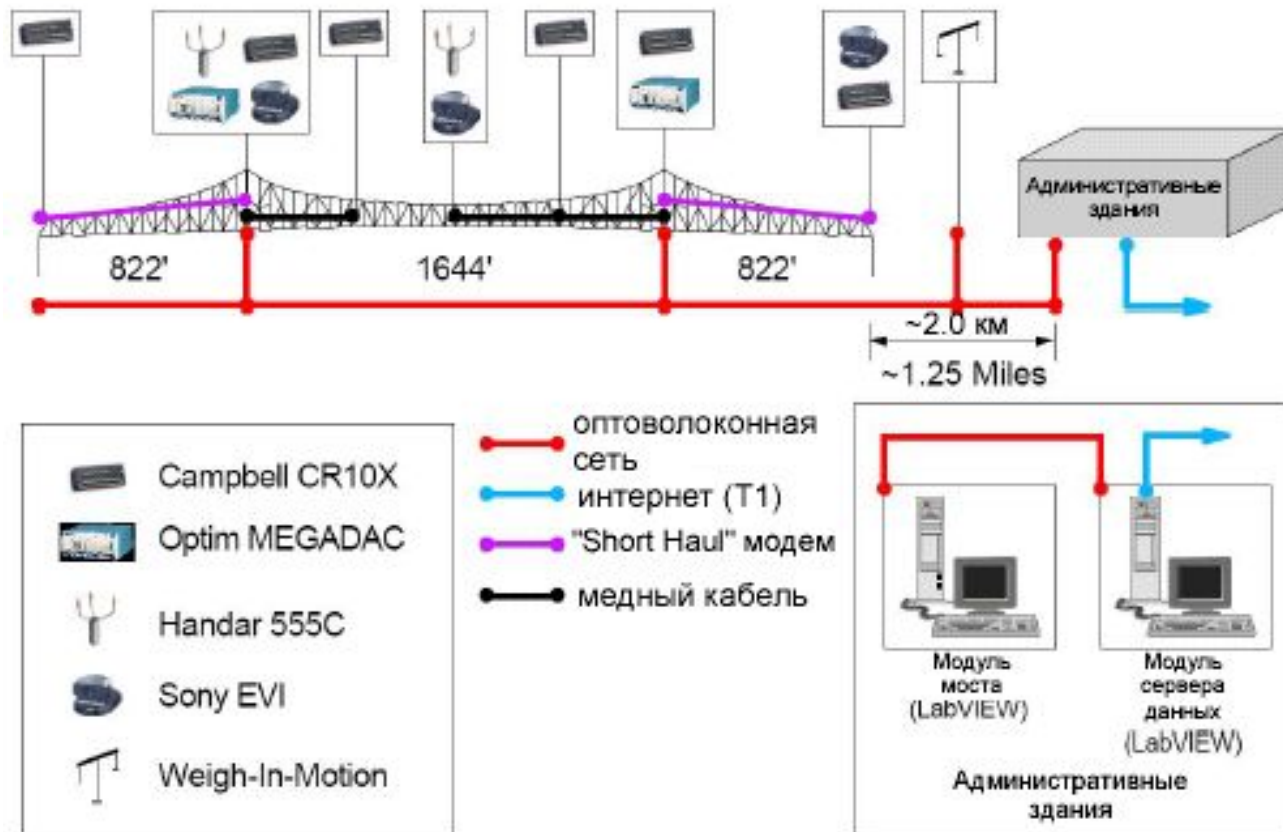


Рис. 3. Схема измерительной сети на мосту «Коммодор Джон Бэрри»

Система мониторинга моста «Коммодор Джон Бэрри» включает следующие блоки: измерение с помощью датчиков, сбор данных и контроль; обработка данных и информационное управление; интерфейс с человеком для управления и корректировки поведения.

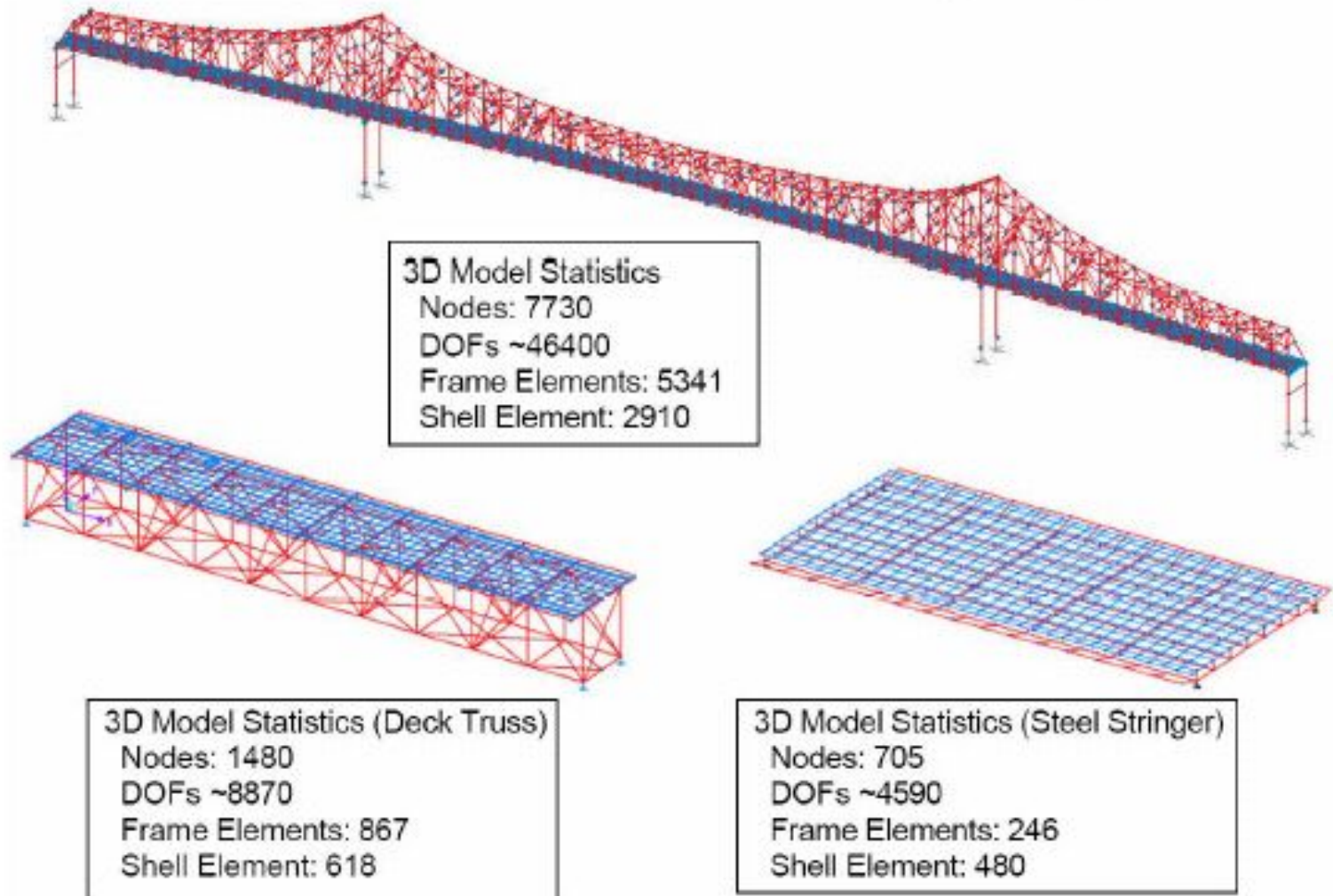


Рис. 4. Конечно-элементная модель моста.

Portal - <http://jhgame2002.yeah.net>

MAIN

Delaware River Port Authority  
of Pennsylvania and New Jersey

Wed, Aug 21 14:12:04 2002

MAIN CONTROL PANEL

Temperature: 83 F  
Humidity: 37 %  
Wind Speed: 3 Mph  
Wind Direction: S

Weigh in Motion

Lane 1

Vehicle #	Class
25541	7 -> Axle Mult U. Trailer
Speed	Length
61 kph	2580 m
Weight	Axles
73.23 T	7
ESAL	
21.67 T	

Lane 2

Vehicle #	Class
n/a	n/a
Speed	Length
n/a	n/a
Weight	Axles
n/a	n/a
ESAL	
n/a	n/a

Panel Point 13

PR1202/2VF Wed Aug 21 14:09:22 2002

home on off  
zoom in Presets  
zoom out

Panel Point 35

PR3502/1VG Wed Aug 21 14:09:22 2002

home on off  
zoom in Presets  
zoom out

Panel Point 57

PR5702/3VH Wed Aug 21 14:09:22 2002

home on off  
zoom in Presets  
zoom out

**Рис. 5. Интерфейс системы управления мостом «Коммодор Джон Бэрри» в реальном режиме времени.**

**Система наблюдения технического состояния** объединяет эксплуатирующую организацию и специалистов, ответственных за эксплуатацию, обслуживание и управление мостом для получения максимальной эффективности. При этом весьма важно решение задачи о взаимоотношениях владельца системы непрерывного мониторинга моста и пользовательской связи, информационных и аварийных протоколов, а также задачи обучения персонала и поддержки обслуживания.

На рис. 5 показан пользовательский интерфейс **системы непрерывного мониторинга состояния моста «Коммодор Джон Бэрри»**, предназначенный для рассмотрения в реальном времени изображений моста и информации от поста весового контроля (системы взвешивания на ходу), а также данных от метеостанции. Верхнее левое окно этого интерфейса разрешает пользователю вызвать любой из почти 500 каналов поступления данных от моста и рассматривать их в реальном времени. Преимущества возможности одновременного анализа изображений и данных, а также возможность дальнейшей обработки данных для контроля технического состояния и поведения моста очевидны. При этом весьма важна возможность обнаружения и своевременного реагирования на различные неблагоприятные ситуации и дорожно - транспортные происшествия.

***Преимущества возможности одновременного анализа изображений и данных, а также возможность дальнейшей обработки данных для контроля технического состояния и поведения моста очевидны. При этом весьма важна возможность обнаружения и своевременного реагирования на различные неблагоприятные ситуации и дорожно - транспортные происшествия.***



**В будущем создаваемые системы непрерывного мониторинга состояния сооружений** могут получать данные со спутников, самолетов и наземных баз изображения и данные о погоде, грузонапряженности, дорожной ситуации и реакции сооружения на эти воздействия, смогут обобщать и предоставлять в графическом виде данные для рассмотрения их координаторами в режиме реального времени, с целью более эффективного управления человеческими и материальными ресурсами, противодействия внешним воздействиям. **Системы непрерывного мониторинга состояния транспортных сооружений** могут быть подключены к объединенным информационным системам, которые позволят должностным лицам и инженерам анализировать накопленные и только что полученные данные для более полного анализа ситуации.

## **Системы мониторинга состояния большепролетных мостов в Японии**

**Мониторинг технического состояния мостовых конструкций является весьма актуальной задачей для Японии, так как в ней в последние годы были построены мосты с рекордно большими пролетами. Это задача эффективного контроля, надежного анализа, рациональной интерпретации данных, а также и обеспечения правильного принятия решений по эффективному управлению поведением мостов**

**Рассмотрим систему мониторинга технического состояния моста «Акэси Кэйкаё» (Akashi Kaikyō).**

**Мост «Акэси Кэйкаё» - самый длинный висячий мост в мире, пересекающий одноименный пролив, был открыт для движения 5 апреля 1998.**

**Мост расположен на национальной автомагистрали №28, связывающей острова Хонсю и Сикоку, на участке между городом Кобэ и островом «Awajishima» (рис.6).**

# Система мониторинга технического состояния моста

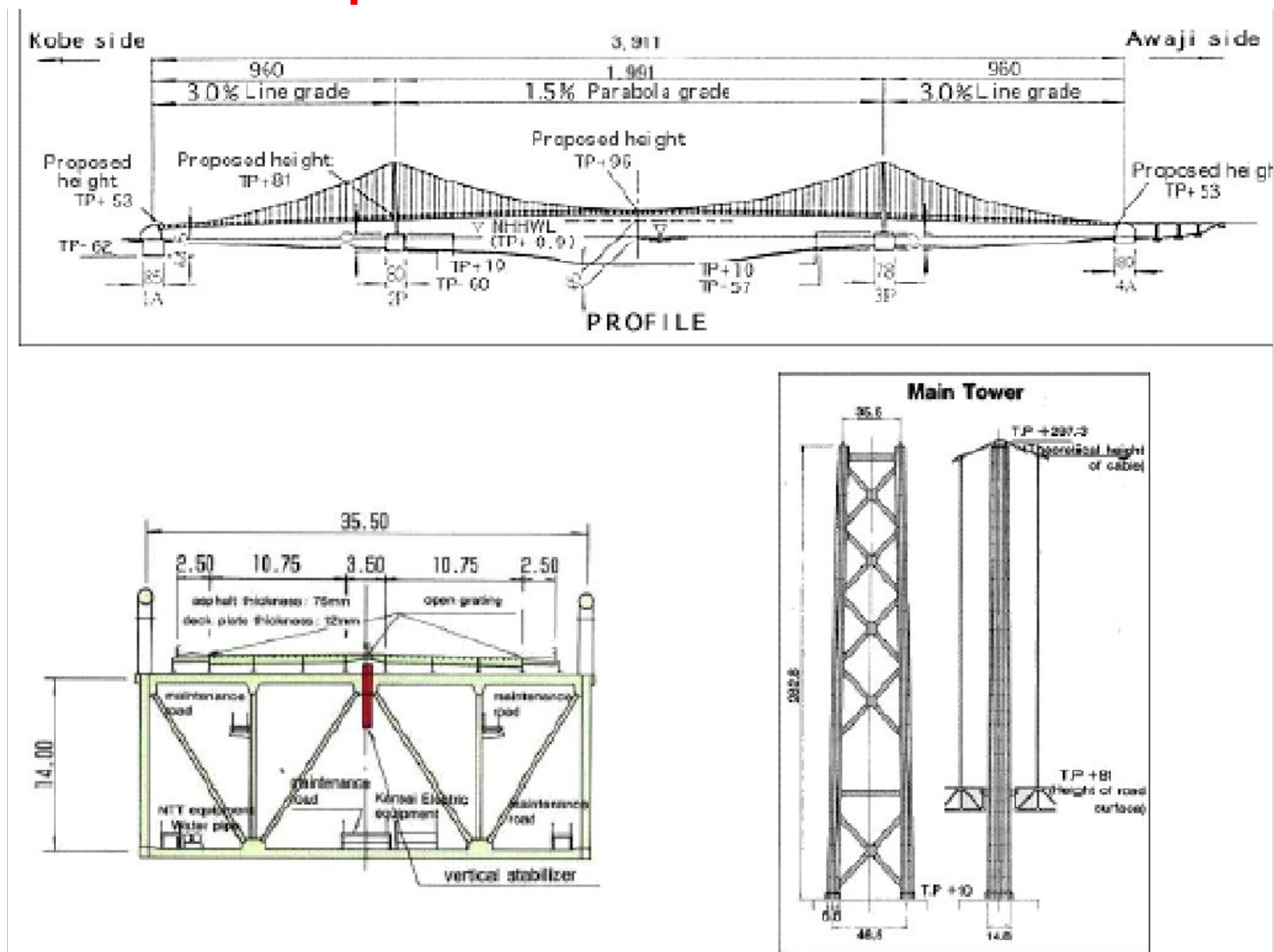


Рис. 6. Схема моста «Акэси Кэйкаё»

**Схема моста 960 + 1991 + 960 м. Общая длина моста 3911 м.**

Стальные пилоны возвышаются на 297 м над уровнем моря. Несущие кабели сделаны из высокопрочной оцинкованной проволоки с прочностью на разрыв 1800 Н/мм<sup>2</sup>. Кабель составлен из 290 пучков, каждый из которых содержит 127 проволок диаметром 5,23 мм.

Мост рассчитывался на действие ветра с постоянной скоростью 46 м/с, порывами до 78 м/с, землетрясение 8,5 баллов по шкале Рихтера с эпицентром на расстоянии 150 км и землетрясение с вероятностью появления 1 раз в 150 лет на расстоянии 300 км.

Мост предназначен для автодорожного движения по шести полосам с расчетной скоростью до 100 км/ч.

Проектирование мостов с такими большими пролетами потребовало разработки новых норм, отражающих вопросы аэродинамической, сейсмической устойчивости и принятия ряда решений при проектировании.

*Система мониторинга данного большепролетного моста была создана для подробного анализа поведения моста при землетрясении и/или тайфуне, но она используется и для контроля поведения моста в процессе его эксплуатации.*

## Система мониторинга технического состояния моста «Акэси Кэйкаё» (Akashi Kaikyo)

Система мониторинга мостового сооружения была создана для решения следующих задач:

### 1) Проверка проекта:

- получение данных о динамическом поведении сооружения, которые используются для проверки гипотез и допущений, использованных в проекте при расчетах на действие сильного ветра и землетрясения;
- получение данных, необходимых для совершенствования процесса проектирования, повышения его рациональности;
- разработка достоверной системы наблюдения за состоянием мостового сооружения, которая имеет функцию самопроверки и способна непосредственно обнаруживать нарушения в своей работе.

### 2) Эксплуатация мостового сооружения:

- Получение данных для анализа и количественной оценки эксплуатационного состояния мостового сооружения;
- получение данных для оценки накопления повреждений в конструкциях мостового сооружения и ухудшения его рабочих характеристик;
- организация дорожного движения:
- получение данных, обеспечивающих безопасный уровень дорожного движения при землетрясении или сильном ветре.
- получение данных для того, чтобы оценить надежность конструкции после землетрясения или после тайфуна и способность ее пропускать транспортный поток.

Область действия наблюдения включает в себя две большие группы параметров, а именно, воздействующие нагрузки и реакцию конструкции. К наблюдаемым нагрузкам и воздействиям относятся ветер, землетрясение, температура и подвижные нагрузки. К реакциям конструкции относятся перемещения, ускорения, напряжения, деформации и усилия в элементах моста, перемещения и напряжения в основных кабелях.

Таблица 1. Наблюдаемые параметры моста «Акэси Кэйкаё»

Область наблюдения	Направление изучения	Измеряемый параметр
Характеристики землетрясения	Сейсмические смещения и магнитуды Частотные характеристики землетрясения Грунтовые характеристики Фазовая разность	Ускорение
Динамическая реакция на землетрясение	Действующие сейсмические силы Перемещение Собственные частоты Сейсмические движения пролетного строения	Ускорение конструкции (скорость) Перемещение
Характеристики ветра	Основная скорость ветра Проектная скорость ветра Характеристики переменной скорости ветра - интенсивность турбуленции - пространственная корреляция - спектр мощности	Направление и скорость ветра
Динамическая реакция (отклик) сооружения на ветер	Собственная частота пролетного строения Конфигурация вибрационного режима Структурная амортизация Реакция на воздействие порыва ветра Поведение пилона	Ускорение конструкции (скорость) Перемещение Основная частота Скорость ветра и ускорение конструкции Перемещение конструкции

Схема установки датчиков на мосту «Акэси Кэйкаё» (рис. 6).

Два сейсмометра установлены на берегах (зоны 1А и 4А). Во избежание искажения вибрационной картины фундаментами сейсмометры установлены на расстояниях 100м от оси моста (1А) и 20м от оси моста (4А).

Для определения характеристик ветра в зоне моста, распределения ветра по направлению и скорости установлены анемометры. Измерения производятся в продольном и поперечном направлениях. Для сравнения реального динамического поведения фундамента при землетрясении с расчетными значениями, на каждом фундаменте были установлены трехкомпонентные акселерометры.

Для фиксации характера вибрационного поведения балок и пилона на при действии ветра и землетрясения были установлены датчики скорости.

На вершинах опоры 1А и пилона 2Р и в середине центрального пролета были установлены устройства GPS. Координата 1А была принята в качестве исходной. Смещения других координатных точек рассчитывались в трех направлениях: продольном, вертикальном и поперечном.

На западных и восточных гранях опоры 2Р со стороны центрального пролета, и на западной стороне опоры 3Р со стороны бокового пролета были установлены датчики перемещений, которые измеряли перемещения балки жесткости.

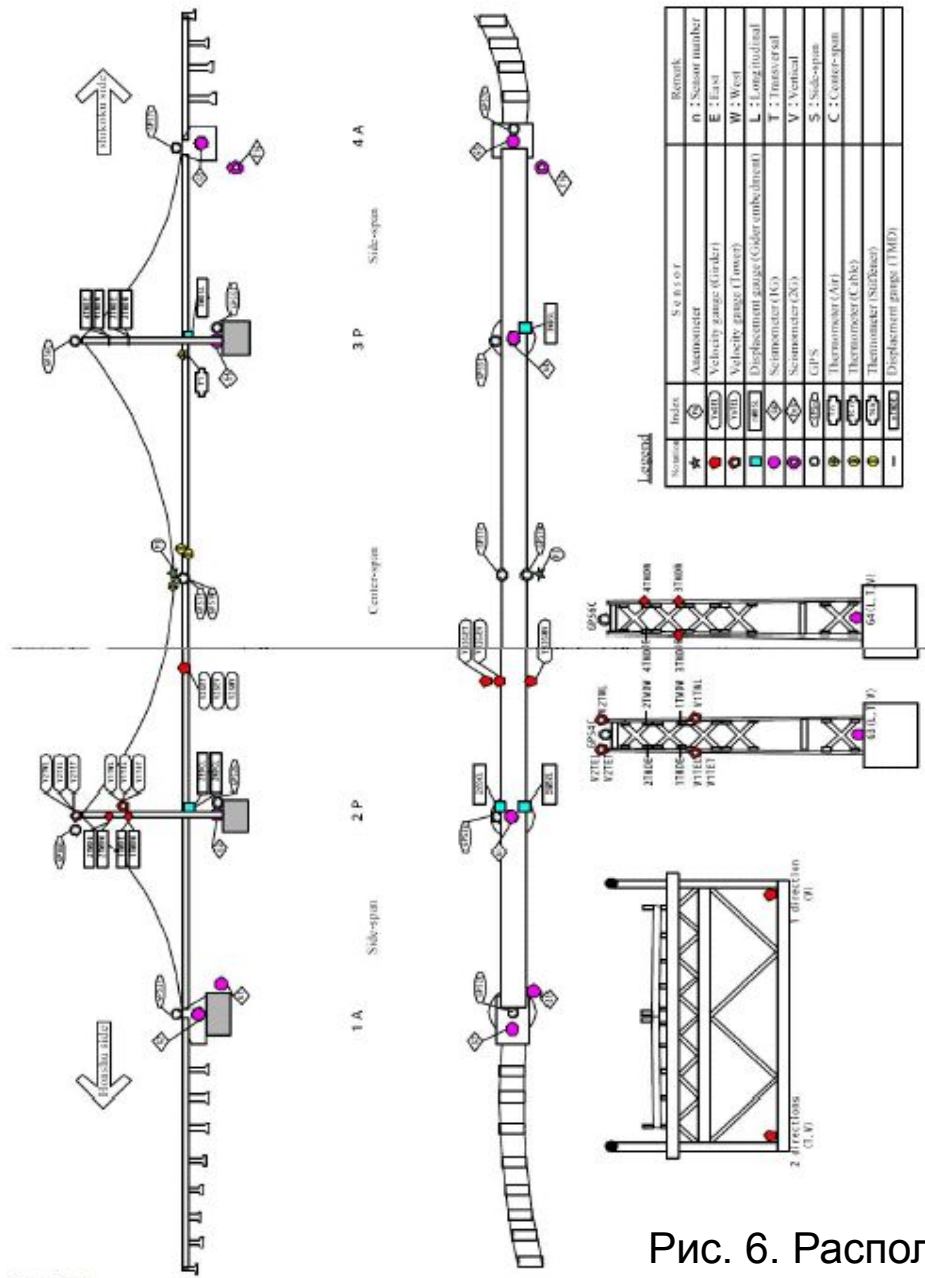


Рис. 6. Расположение датчиков системы мониторинга моста «Акэси Кэйкаё».



Информационная сеть системы непрерывного мониторинга состояния моста «Акэси Кэйкаё» состоит из следующих частей (рис.8):

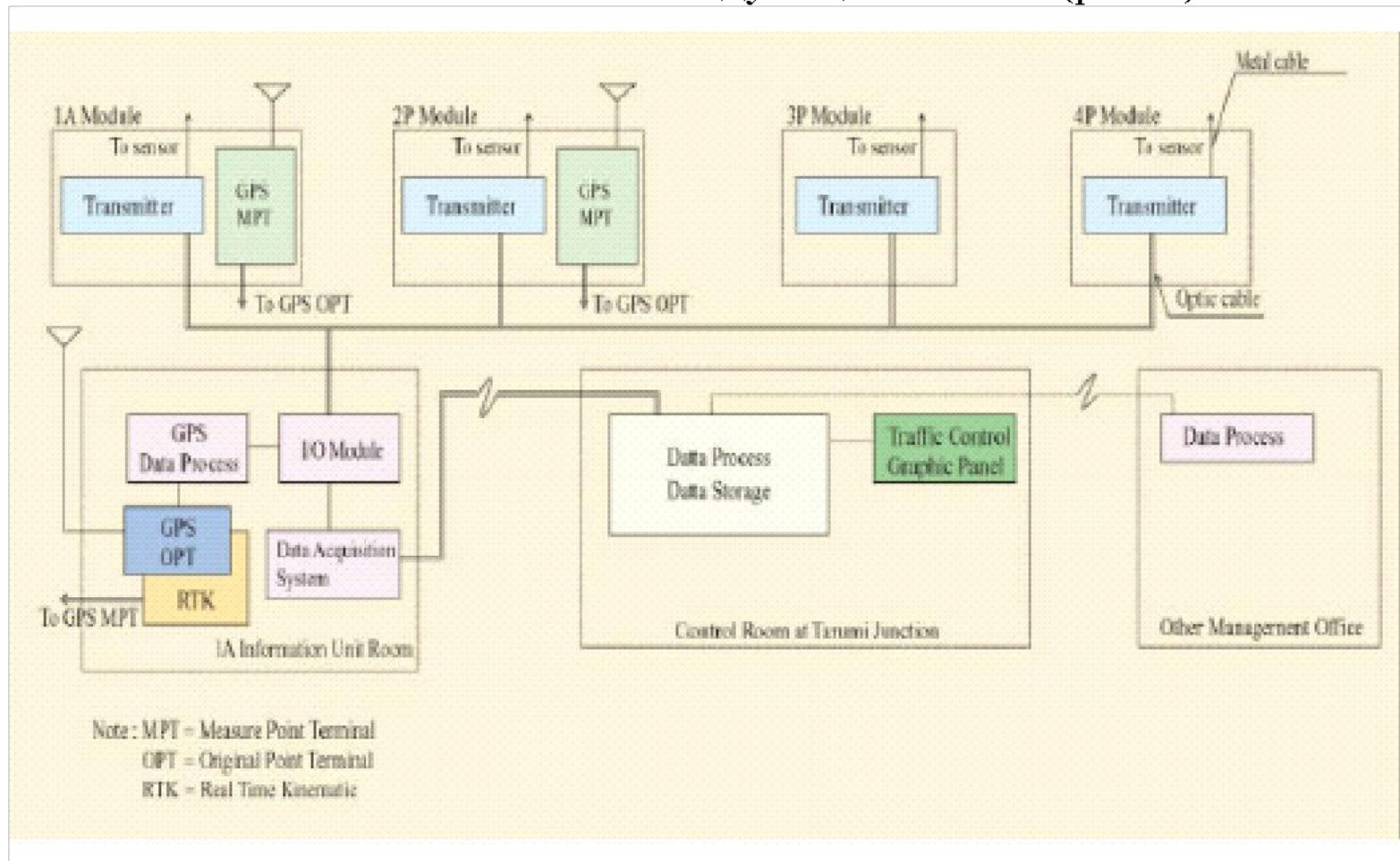


Рис. 8. Структура информационной сети системы непрерывного мониторинга состояния моста «Акэси Кэйкаё».

В скором будущем сотрудник, обладающий правом доступа и знающий секретный пароль, может получить доступ к состоянию конструкции из любой точки в мире, фактически не находясь в зоне расположения моста (рис.9).

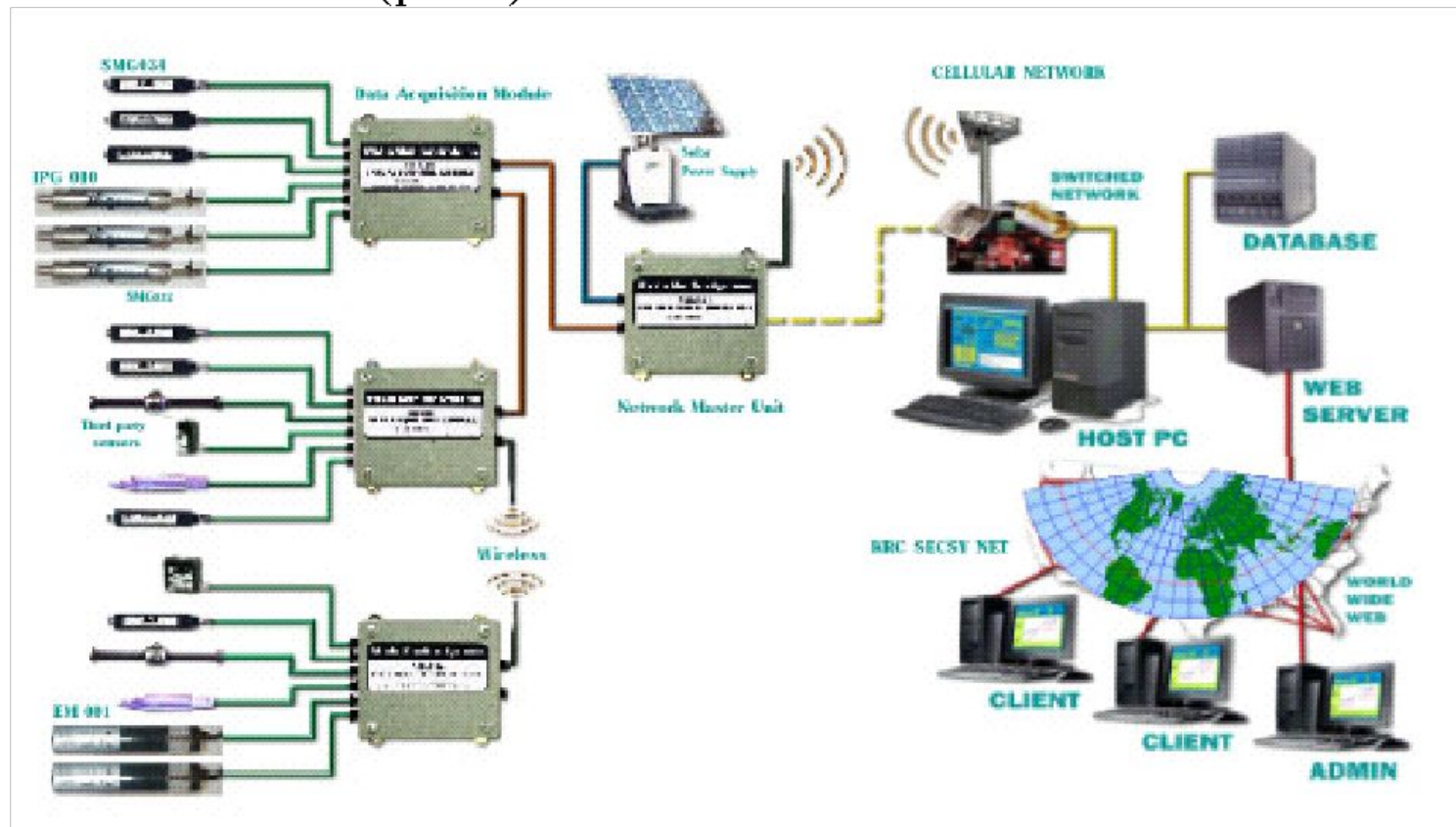
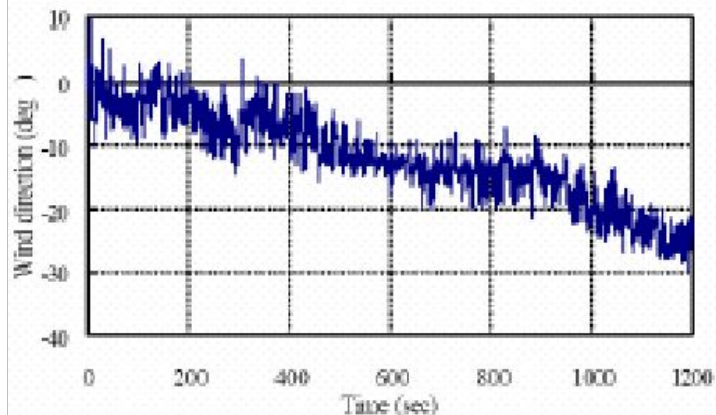
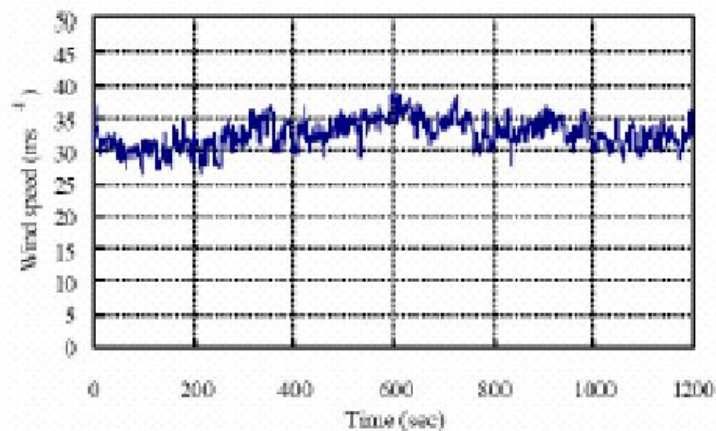


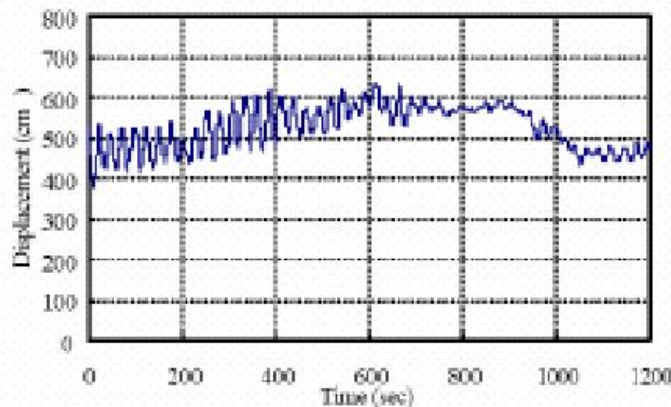
Рис. 9. Перспективная информационная сеть системы приборного мониторинга состояния мостов в Японии.



(a) Wind direction (Perpendicular to bridge axis:  $W=0^{\circ}$ )



(b) Wind speed



(c) Lateral displacement of Girder at the center of the bridge

Рис. 10. Временные диаграммы направления ветра, скорости ветра и смещения балки во время Тайфуна (14:13 и 14:33, 22 сентября 1998 года): (a) направление ветра; (b) скорость ветра; (c) боковое смещение балки в середине моста

# Мониторинг состояния мостовых сооружений в Европе

Известно, что мосты являются самыми уязвимыми элементами транспортной инфраструктуры - выход их из строя причиняет большие как для перевозчиков (задержки времени и перепробег), так и для собственников дорог и эксплуатирующих организаций. Наблюдение и контроль за техническим состоянием мостов может рассматриваться как средство для поддержания мостов в надлежащем эксплуатационном состоянии, как средство информационной поддержки планирования обслуживания, ремонтов, усиления в условиях ограниченного финансирования. Кроме того, цель мониторинга состоит в том, чтобы обнаружить начало процесса ухудшения состояния, исследовать и идентифицировать причины ухудшения.

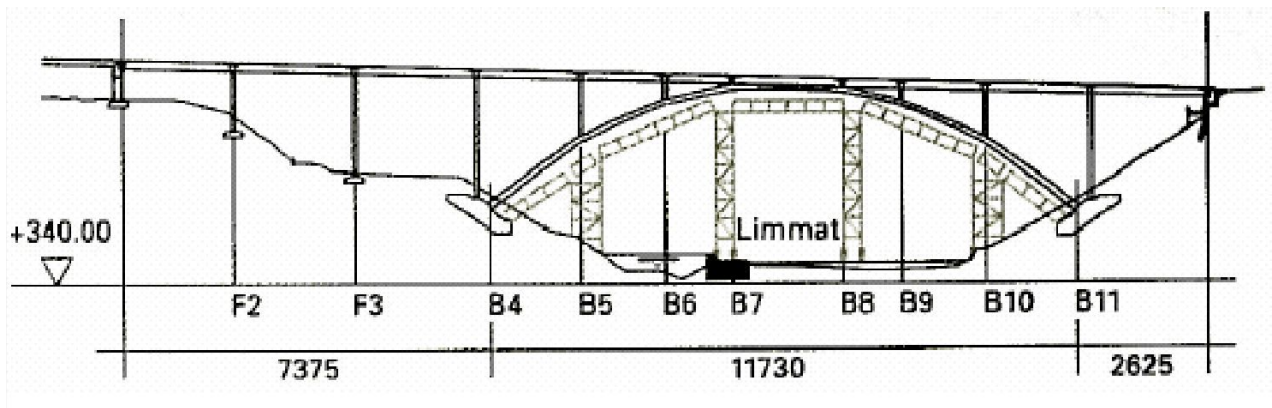
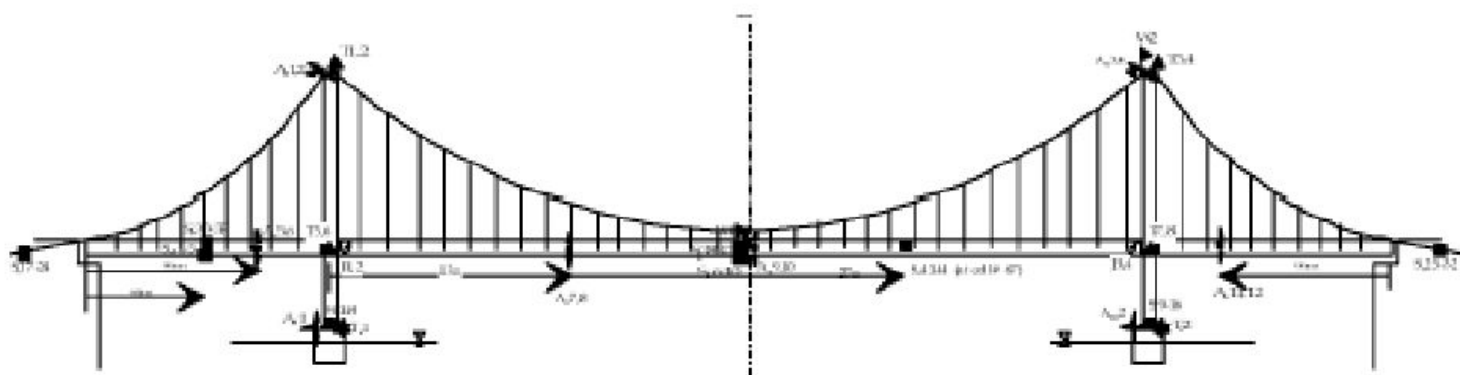


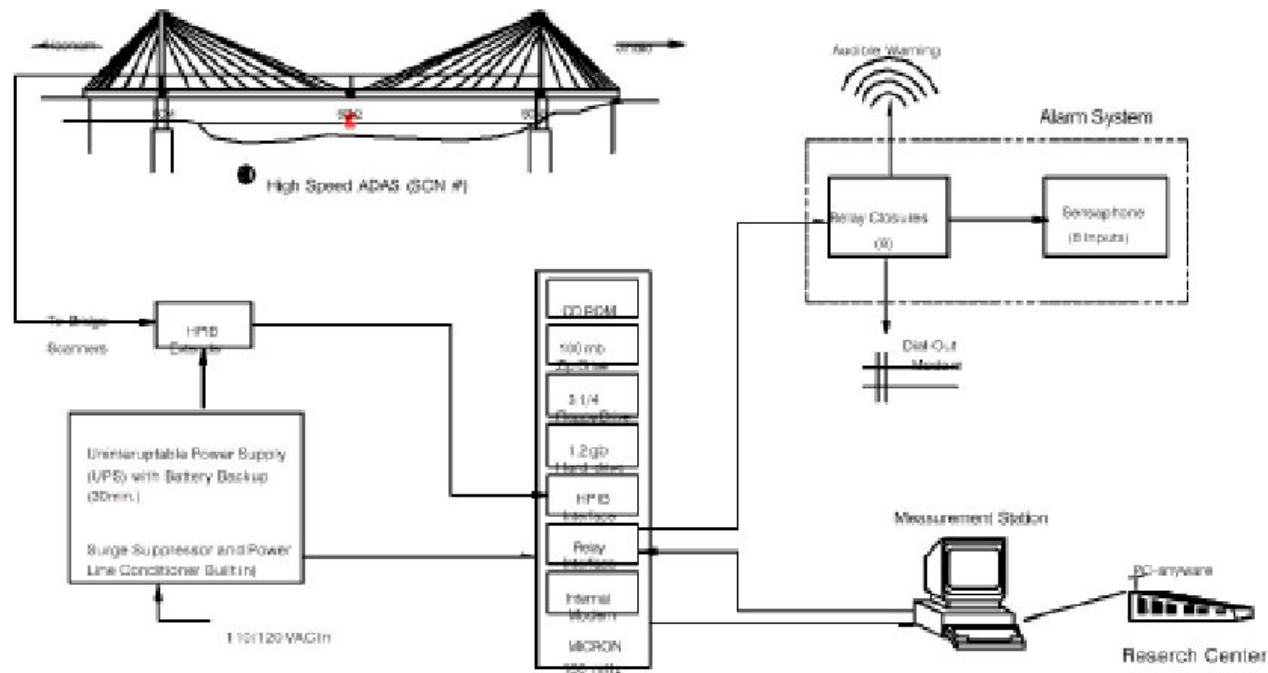
Рис. 11. Схема моста через реку Лиммат с установленными подмостями.

Мост «Сигенталь» - железобетонный арочный с пролетом арки 117м, построен над рекой «Лимат» (Limmat) в Бадене, Швейцария. Мостовой переход включает два подхода с одним пролетом на одном берегу и тремя пролетами на другом. Полная длина моста 217 м. На рис.6.11 приведена схема подмостей, которые использовались при сооружении арки.



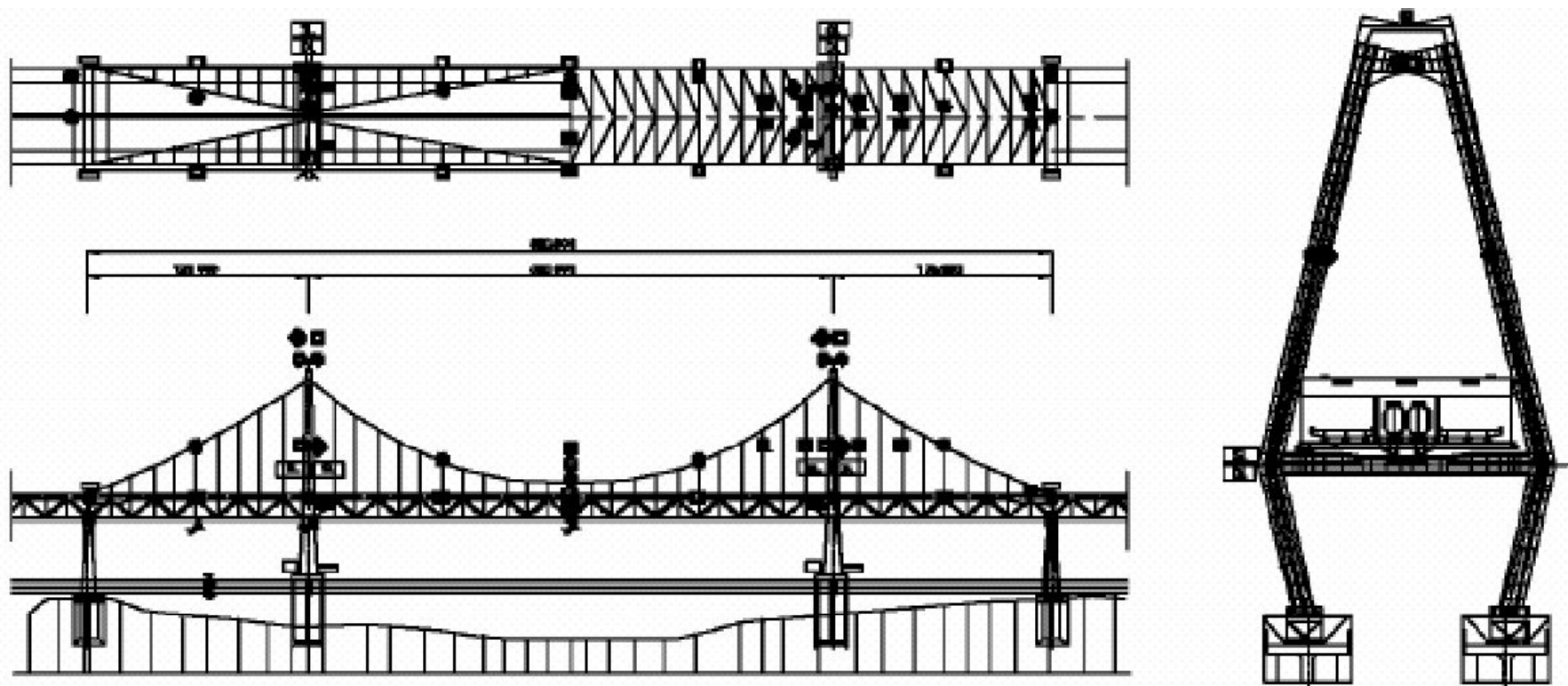
Датчики и аппаратура		Количество	Тип
Статические	Датчик наклона	10	Электролитический, двухосного типа
	Тензомер	44	Струнный датчик
	Преобразователь	2	Корпус, система тревоги, модем
Динамические	Акселерометр	12	Сбалансированный на усилии (одноосный)
	Тензомер с усилителем	10	Тензорезистор
	Акселерометр	2	Сбалансированный на усилии (трехосный) для землетрясения
	Щелемер	4	Линейный датчик перемещения
	Анемометр	2	Трехмерный, пропеллерного типа
	Система DAQ	2	Корпус, триггерная система, система GPS

Рис. 6.15. Схема установки датчиков на мосту Нимхэ.



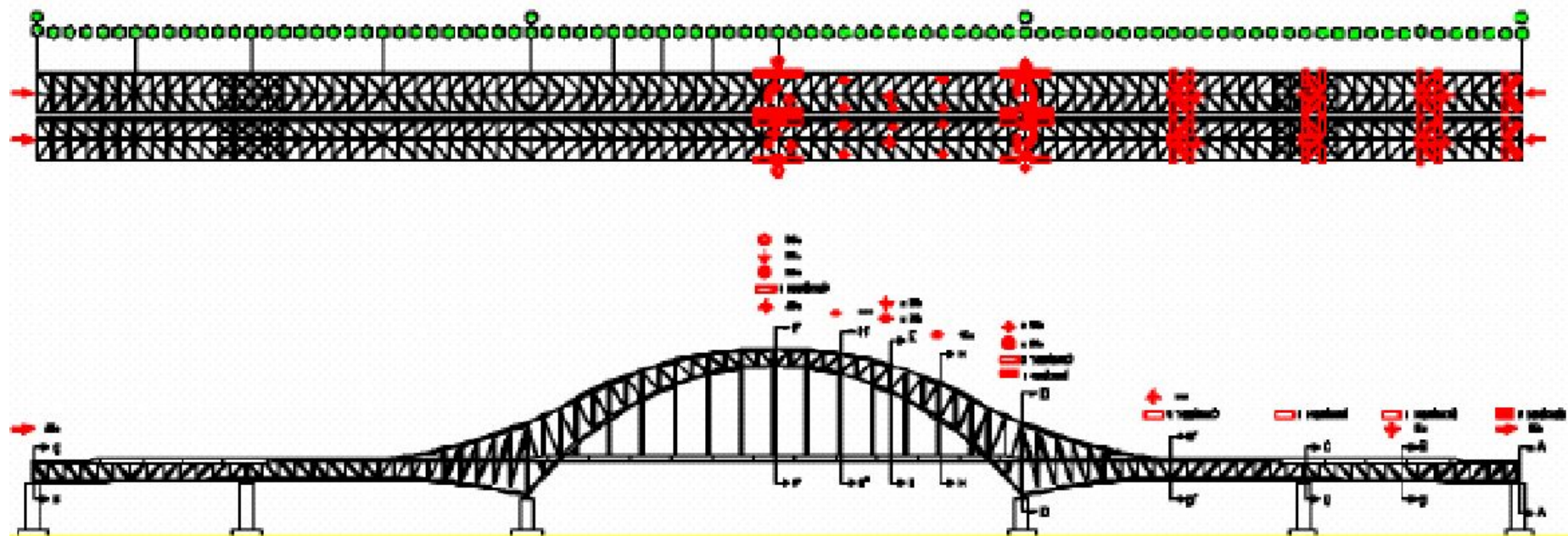
Датчик	Количество	Расположение	Датчик	Количество	Расположение
Угломер	6	Пилон	Щелемер	2	P39, P42
Акселерометр (одноосный)	12	Стальная балка	Усилие в кабеле	24	Вант
	8	Пилон	Анемометр	2	PY1, середина пролета
Тензомер (тензорезисторы)	8	Ж.б. плита	Термопара	14	Балка (6), Пилон (5), Воздух (1), Ванты (2)
	36	Стальная балка	Сейсмомер	2	PY1, PY2 фундамент
	5	Стальная балка (струнный)	Датчик BWIM	6	Асфальтовое покрытие
Лазерный датчик перемещений	1	PY1 – середина пролета			

Рис. 6.16. Схема мониторинга моста «Джиндо»



Symbol	Sensor	Quantity	Behavior	Symbol	Sensor	Quantity	Behavior
●	Thermometer	21Ea	Cable & Member	■	1-D Accelerometer	12Ea	Cable
		12Ea	Tower			4Ea	Tower Top & Deck
=	Static Strain Gage	8Ea@4	Anchor Bolt	□	2-D Accelerometer	10Ea	Deck
		42Ea	Deck, Cross Section			3Ea	Tower Foundation
		10Ea@4	Anchor Plate	⊙	Anemometer	4Ea	Wind
		8Ea	Link Shoe	×	Laser Disp. Sensor	3Ea	
	Dynamic Strain Gage	76Ea	Deck, Cross Section	●	Potentiometer	4Ea	Expansion Joint
		99Ea	Etc.	SL	Static Data Logger	2Ea	
◆	2-D Tiltmeter	10Ea	Tower Inclination	DL	Dynamic Data Logger	2Ea	

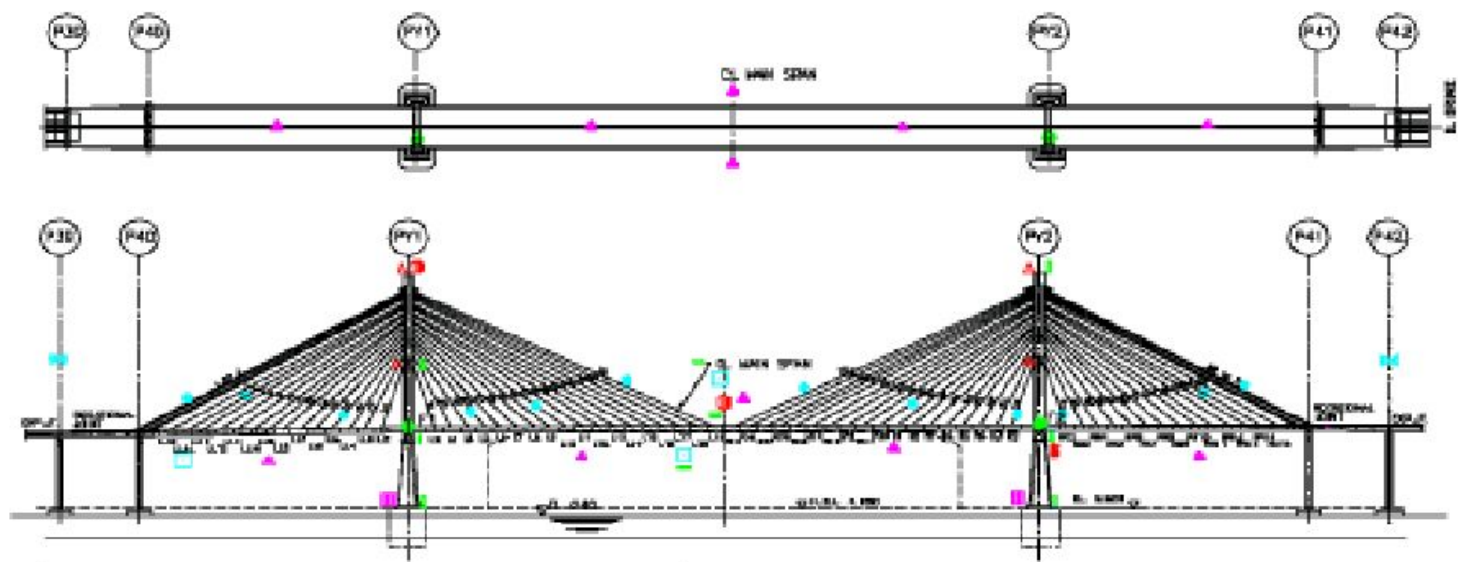
Рис. 6.17. Схема системы мониторинга моста «Яньджонь».



Symbol	Sensor	Quantity
●	Thermometer	12Ea
—	Static Strain Gage	82Ea
	Dynamic Strain Gage	4Ea
⊕	2-D Accelerometer	8Ea
□	1-D Tiltmeter	10Ea
⊞	2-D Tiltmeter	7Ea
→	Longitudinal Disp. Transducer	4Ea
○	Anemometer	2Ea

Рис. 6.18. Схема системы мониторинга моста «Бангва».





Символ	Датчик	Количество	Символ	Датчик	Количество
	Анемометр	2Еа		Статический тензометр	12Еа
	Усилие в кабеле (акселерометр)	12Еа@2		Динамический тензометр	82Еа
	Акселерометр (плита)	6Еа		Лазерный датчик перемещений	4Еа
	Акселерометр (пилон)	4Еа		Щелемер	10Еа
	Угломер	6Еа		Полевой контроллер	4Еа
	Термометр	14Еа		Акселерометр (сейсмический)	2Еа

Рис. 6.19. Схема мониторинга моста «Сеохэ».

# Мониторинг процесса надвигки пролетных строений моста через р. Волгу в Саратовской обл.

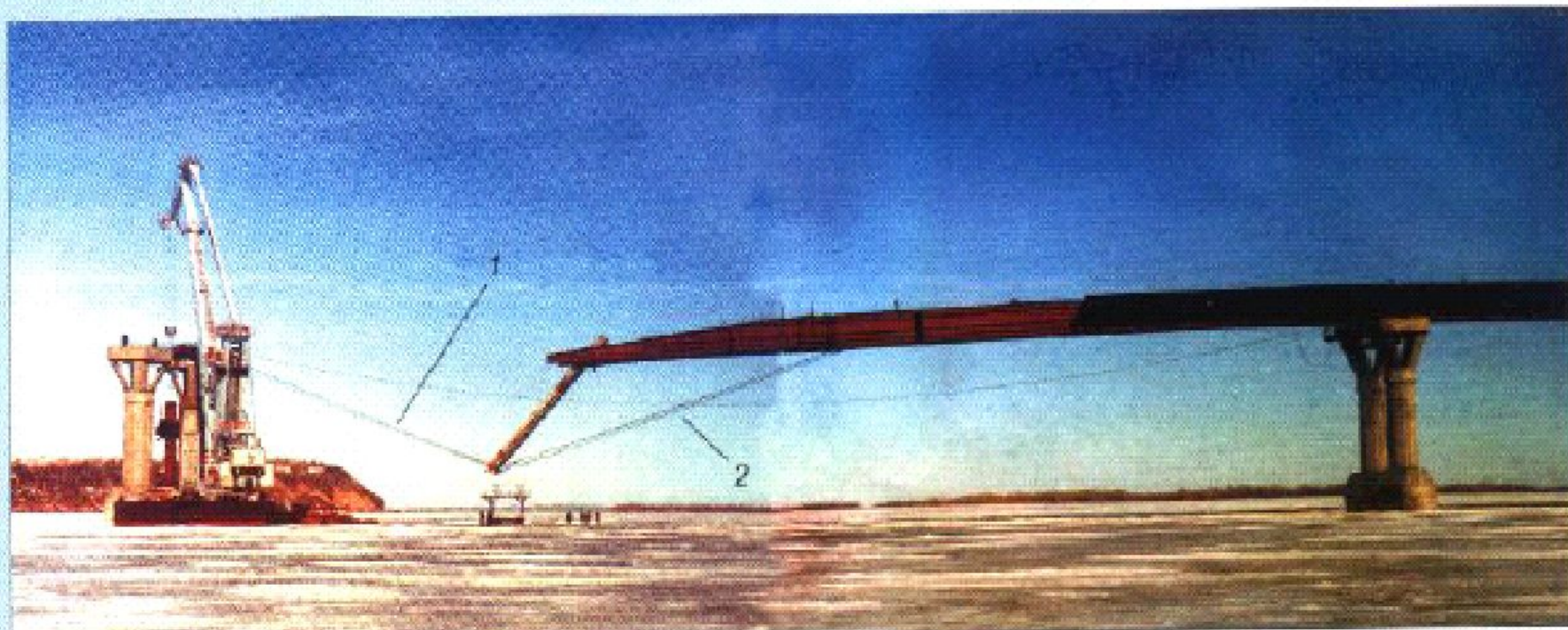


Рис. 2. Схема шпренгельного устройства, примененного при надвигке пролетного строения:

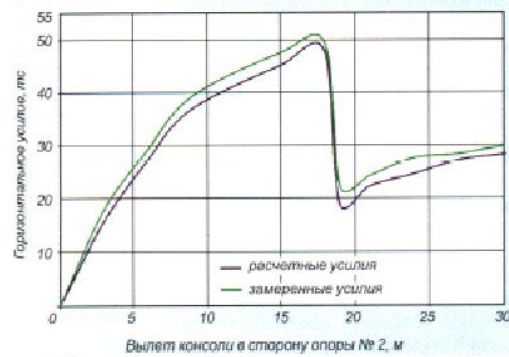
1 — тягач; 2 — оттяжки

Рис. 6.20. Процесс надвигки пролетного строения через реку Волга.



1 – напряжение в стене в 10 см от низа пролетного строения; 2 – напряжение в бетоне столба опоры (по верху ростверка)  
3 – отклонение в плане, мм, и прогиб тарда авыбеса (абсолютная отметка, см); 4 – перемещение оголовков опор, мм; 5 – предельные (критические), теоретические и реальные вертикальные реакции на опорах; 6 – усилие в одной ветви тягового трехниточного полиспаста (низового и верхового); 7 – длина надвижки и длина консоли пролетного строения

Рис. 6.21. Вид окон на экране программы представления данных.



а) Горизонтальное усилие на опору 1 (прохождение стыка блоков)



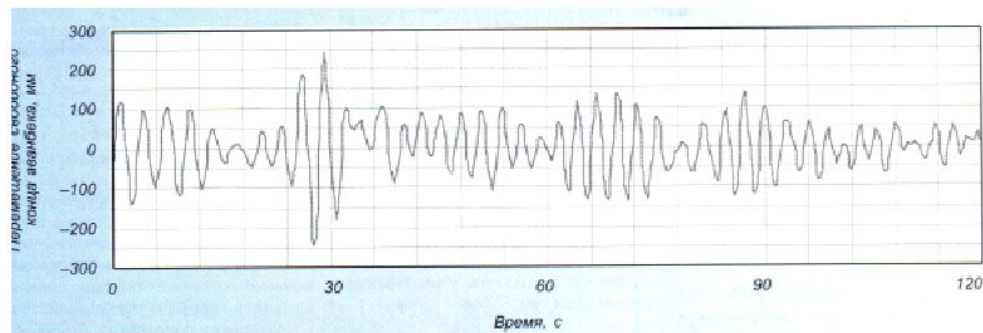
б) Горизонтальное усилие на опору 2



в) Горизонтальное усилие на опору 11

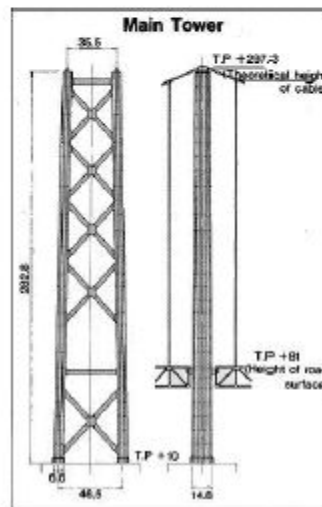
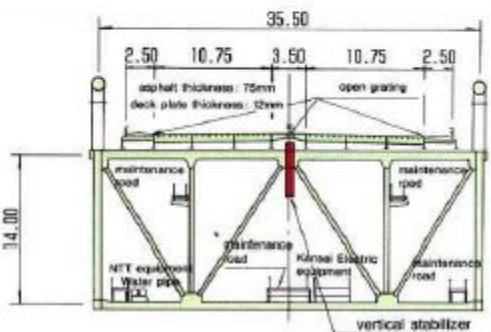
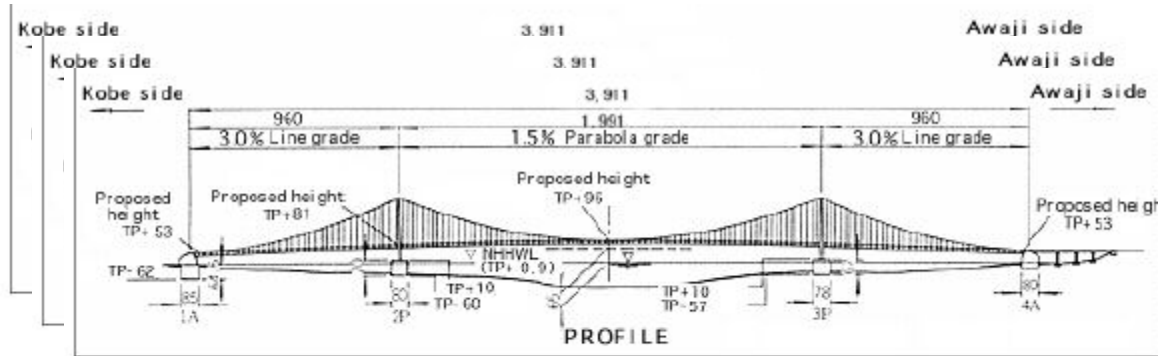


г) Напряжения в стенках балок



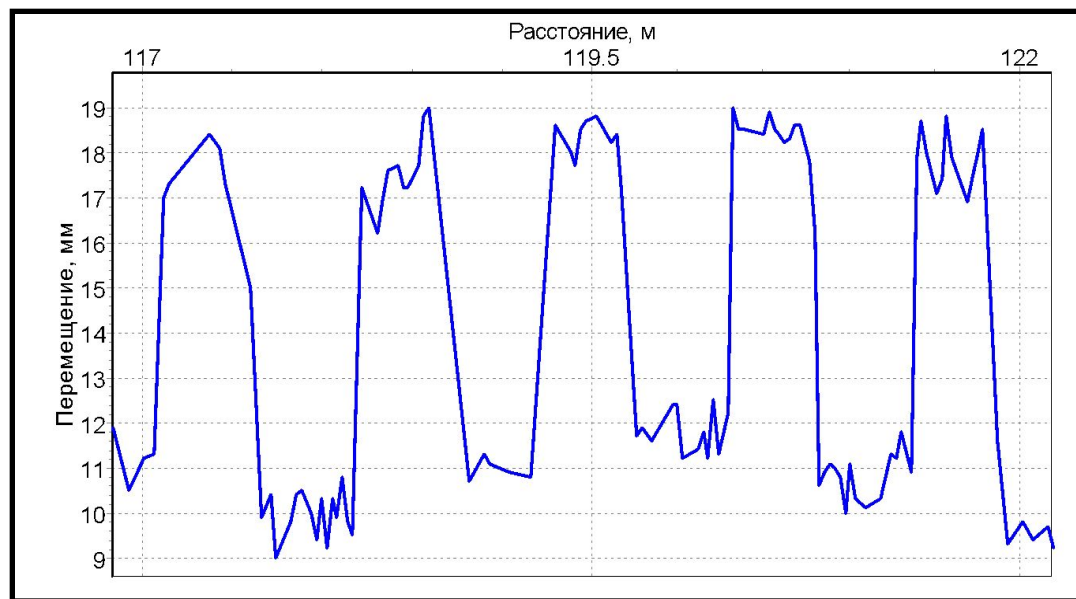
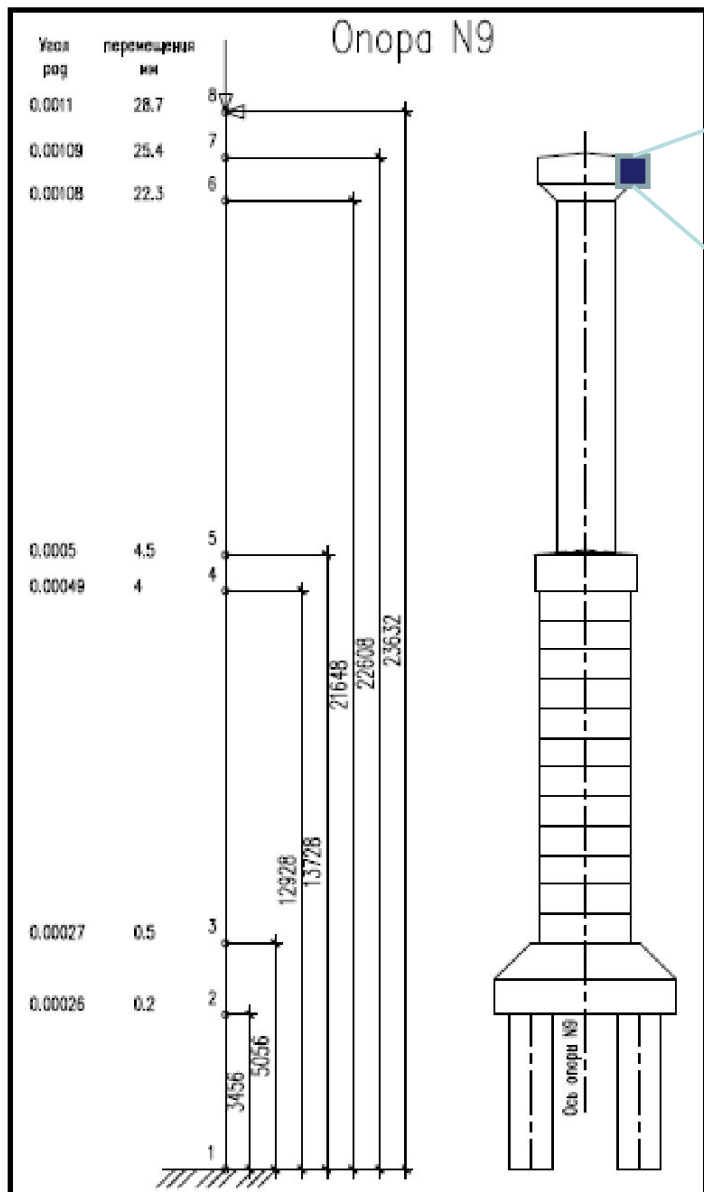
д) Колебание консоли пролетного строения моста

Рис. 6.22. Пример представления результатов мониторинга в процессе продвижки пролетного строения моста через реку Волга.

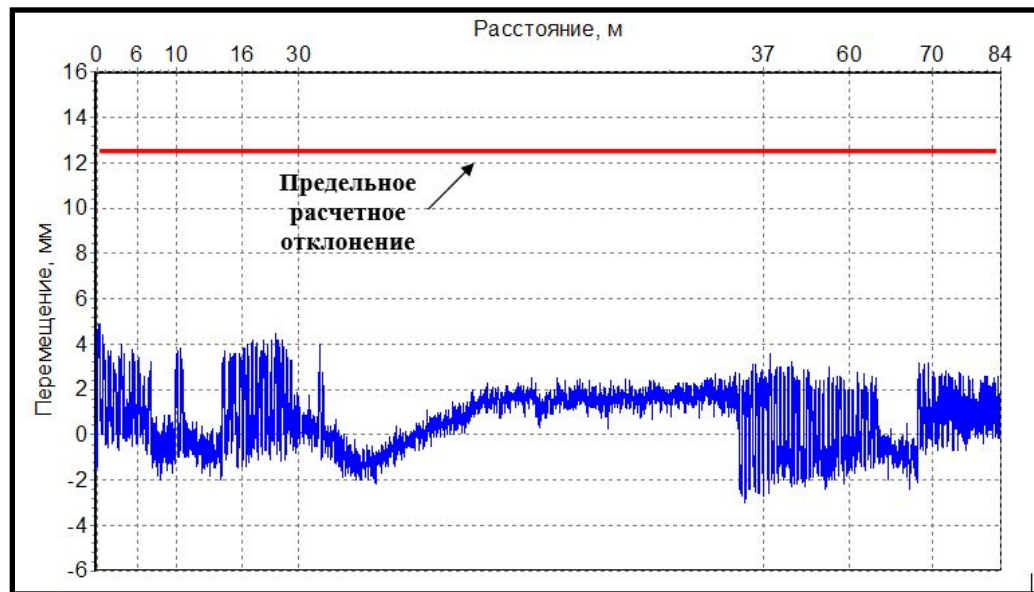
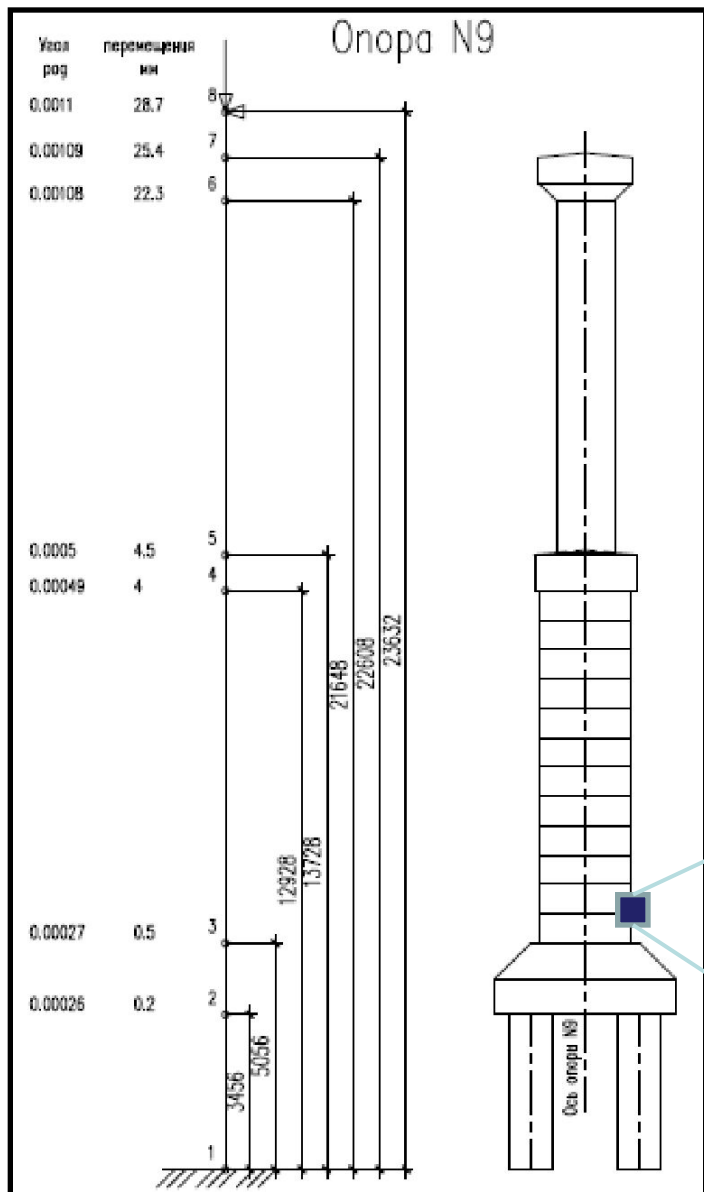


3.4 m  
3.4 m

# Измерение отклонений опор (1-й способ)



# Измерение отклонений опор (2-й способ)

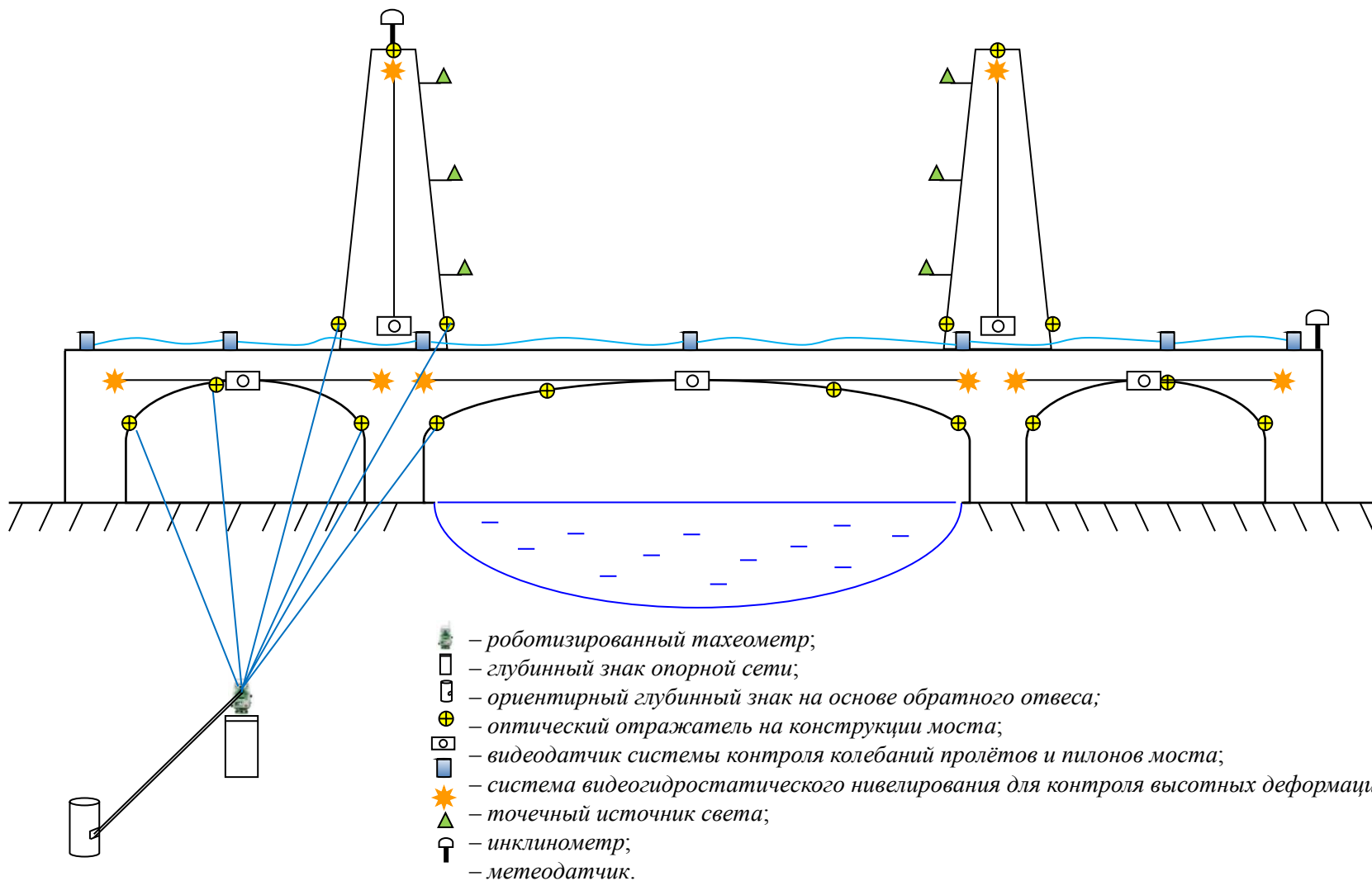


# Измерение положения аванбека





# Схема автоматизации мониторинга



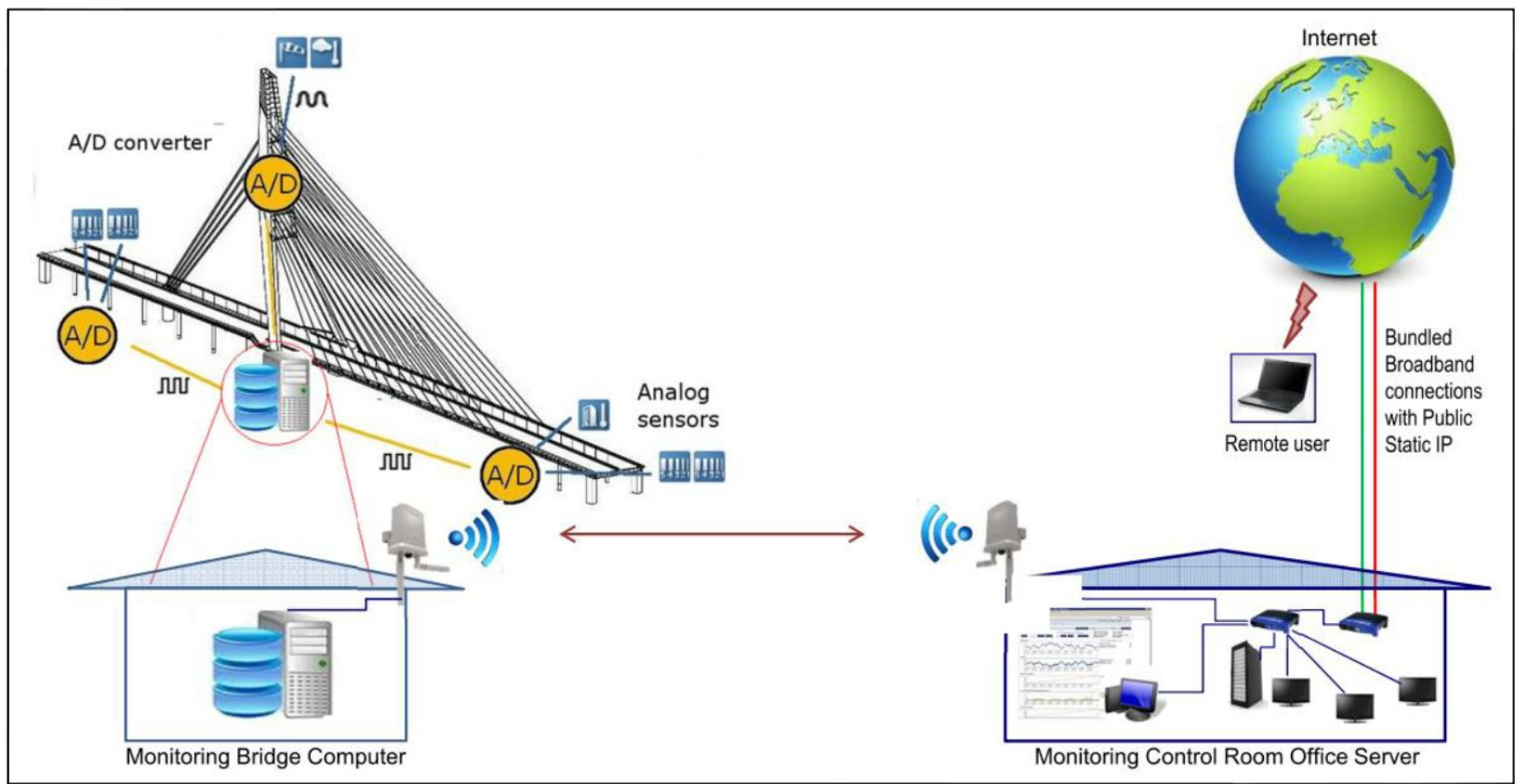


Fig. 1: Schematic representation of a permanent Robo Control monitoring system

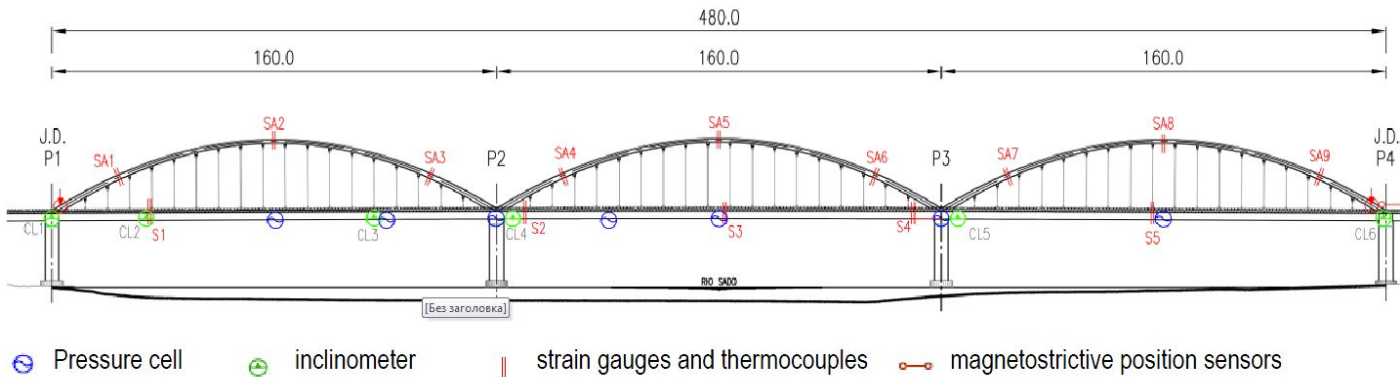
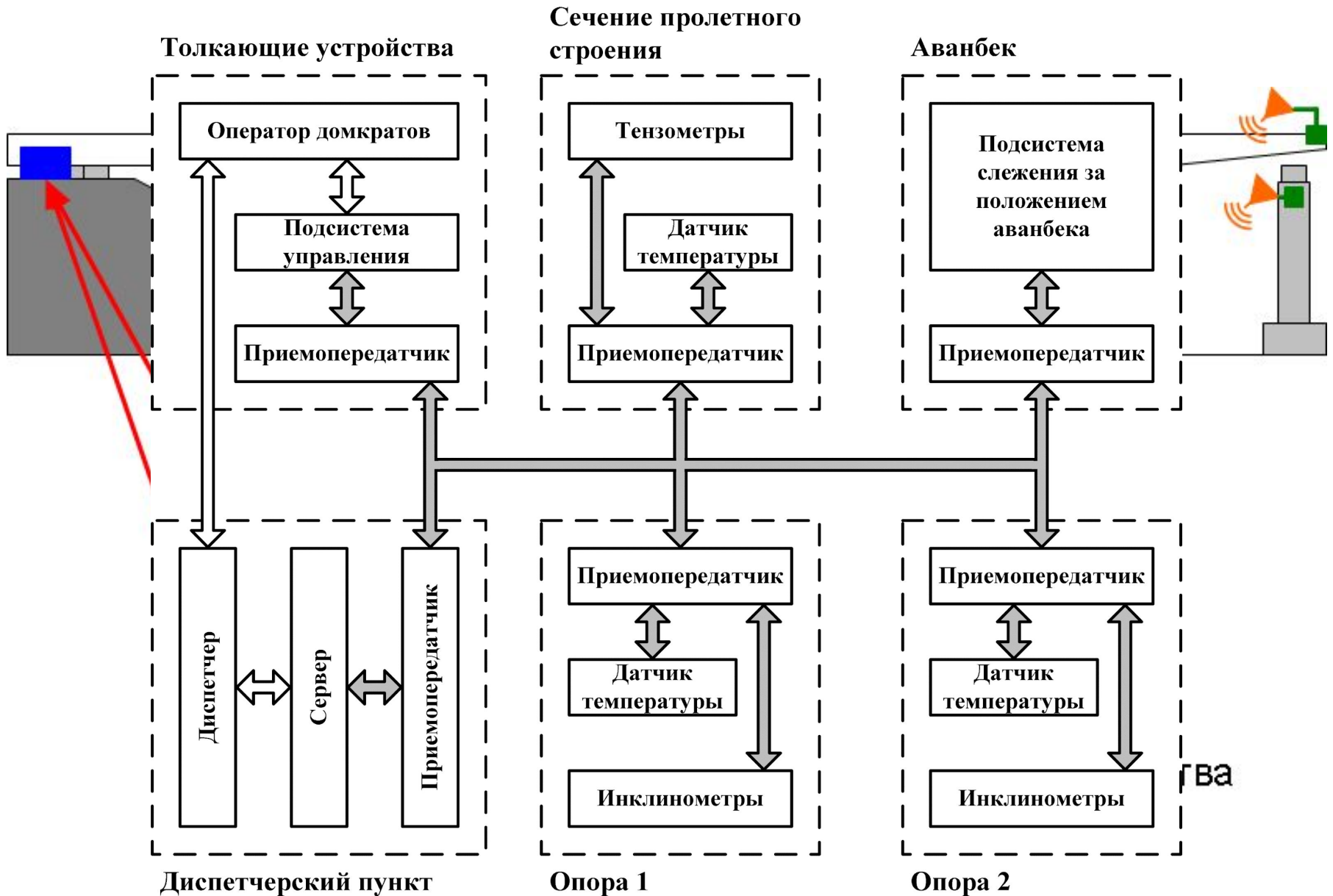


Fig. 4: Structural monitoring general plan

# Система мониторинга



# Измерение отклонений опор (3-й способ)

